

園芸施設における太陽光・風力を利用したハイブリッド型 省エネルギーシステムの試験的構築

安武大輔¹・宮内樹代史¹・北野雅治²・山根信三¹・山本由徳¹

渡部晃由起¹・横山京介³・平井真雄²

(¹高知大学農学部暖地農学科・²九州大学大学院農学研究院・³渡辺パイプ株式会社)

Experimental Development of a Hybrid Solar/Wind System for Energy-saving Management
in a Greenhouse

Daisuke YASUTAKE¹, Kiyoshi MIYAUCHI¹, Masaharu KITANO², Shinzo YAMANE¹, Yoshinori YAMAMOTO¹,
Akiyuki WATANABE¹, Kyosuke YOKOYAMA³ and Masao HIRAI²

¹Faculty of Agriculture, Kochi University; ²Faculty of Agriculture, Kyushu University; ³Watanabe Pipe Co., Ltd.

Abstract: A hybrid solar/wind system for energy-saving management in a greenhouse was newly developed and installed in an agricultural field belonging to the Education and Research Center for Subtropical Field Science, Faculty of Agriculture, Kochi University. This system consists of two main parts: an underground water pipe system and a solar/wind generator system. The pipe system is used for controlling greenhouse air temperature through the exchange of sensible and latent heats between the greenhouse and the water-filled pipe. The solar/wind generation system is used for supplying electrical energy to the pipe system. The performance of the subsystems was assessed by measuring diurnal changes in the rates of heat exchange and generation of electrical energy. During the daytime, both the latent heat and sensible heat of the greenhouse air were stored in the water-filled pipe; during the nighttime, these heats were supplied to the greenhouse. Electrical energy was generated depending on solar radiation and wind speed. These capacities of heat exchange and electrical generation, however, were insufficient for energy-saving management in the greenhouse. From the assessment results, some problems affecting the performance of the system were identified and discussed.

キーワード：園芸施設，省エネルギー管理，自然エネルギー，熱交換，発電

Keywords: Energy-saving management, Greenhouse, Solar/Wind energy, Heat exchange, Electrical generation

緒 言

園芸施設においては、季節に左右されずに生産性を維持・向上させるために、種々の資材・機器・エネルギー等を投入して栽培環境を露地に比べて改善することが行われている¹⁾。とくに、寒候期夜間の低温への対策としては、一般的には暖房のために石油（A重油、灯油）が燃焼・消費されているが²⁾、その量は施設園芸で消費されるエネルギー（熱量換算）の大部分を占める。主要野菜の生産コストにおける光熱費の割合は3割にも達していることから、施設園芸を営む農家にとっては今般の世界的な石油価格の急騰は死活問題であり、寒候期の暖房における省エネルギー対策（石油

消費量の削減)は極めて重要な課題となっている。

一方、地球環境問題の観点から、クリーンな自然エネルギーの利用技術について様々な取り組みがなされている。太陽熱の効率的な蓄熱法や太陽光・風力による発電法の開発が急速に進められており^{3,4)}、それらの技術を施設園芸の省エネルギー化に応用する試みも積極的に行われている⁵⁾。

太陽熱を利用する園芸施設の省エネルギー技術としては、1970年代の石油ショック時に地中熱交換システムが開発された⁶⁾。これは、地中に埋設した多数のパイプに、温室内の空気を循環させることによって、日中の温室内の余剰太陽熱を地中に蓄熱するとともに、その熱を夜間には温室内に放熱する方式である。当時はこの方式が大いに注目を集めて、関連した多くの研究もなされた^{7,8)}。しかし、この地中熱交換システムは、熱伝導率や比熱が低い空気と土壌を熱媒体としているために^{9,10)}、熱交換能力および蓄熱・放熱能力が不足し、それゆえ生産現場に普及するには至っていない。また、太陽光や風力によって得た電力を園芸施設管理に活用する試みは最近のことであり¹¹⁾、基礎的データのさらなる積み重ねが期待されている。

これらの背景を踏まえて、今後、園芸施設における有効的な省エネルギー技術が構築されれば、先の問題(石油消費量の削減)を解決できるとともに、地球温暖化の要因とされる二酸化炭素ガスの排出削減にも寄与するものと考えられる。そこで著者らは、地中熱交換システムの欠点を克服し得る地中貯水パイプ蓄放熱システムを新たに考案して、太陽光・風力発電システムと組み合わせた「ハイブリッド型省エネルギーシステム」を高知大学農学部において試験的に構築した。本稿では、ハイブリッド型省エネルギーシステムとその特性試験の結果について報告するとともに、実用化に向けて解決すべき課題についても取り扱う。

材料および方法

ハイブリッド型省エネルギーシステム

園芸施設管理における省エネルギー化を目的として、新規に構築したハイブリッド型省エネルギーシステムの模式図を Fig.1 に示す。本システムは、主に、蓄放熱ユニット(地中貯水パイプ蓄放熱システム、太陽熱温水器)および発電ユニット(太陽光・風力発電システム)の2つから構成されている。将来的に既設営農温室への導入を想定して、本システムを高知大学農学部附属暖地フィールドサイエンス教育研究センター内の温室(型式:AP30、長さ:19m、幅:6m、高さ:4.2m、(株)日之出産業)において構築した(Fig.2)。また、温室内部には灯油暖房機(型式:FA-403、総発熱量:127.7MJ h⁻¹、消費電力510W、(株)長府製作所)も設置されている。この温室に隣接した東側には、今後の試験研究の比較対照用として同型温室が並んでいる。

蓄放熱ユニット

地中貯水パイプ蓄放熱システムにおいては、高比熱の水を満たした汎用大口径塩ビパイプ(直径0.4m; 地中貯水パイプ)を地温がほぼ一定となる地中2mに埋設し、送風機(型式:VFC-408P-0.75kW、消費電力:0.75kW、(株)富士電機機器)と送風管(直径0.05m)によって、温室内の空気を地中貯水パイプ内の水中に直接吐出させている(Fig.1)。すなわち、温室内と地中貯水パイプ間において空気が連続的に循環することで熱が効率よく交換され、日中の日射に由来する温室内余剰熱の地中貯水パイプへの蓄熱、および夜間の地中貯水パイプから温室内への放熱が期待される。さらに、空気と水との直接的な接触による熱交換が行われるため、両者の温度差によって交換される顕熱だけではなく、水の相変化に伴う潜熱の交換も十分に期待されると考える。

また、日中は、貯水パイプ内の水を水循環ポンプ(型式:N3-136SH、消費電力:0.28kW、(株)川本製作所)によって汲み上げて太陽熱温水器(型式:SWR-300、パネル面積:4.96m²、(株)長府製作所)に循環させることにより、貯水パイプへの蓄熱を促進させる補助機能も備えている。

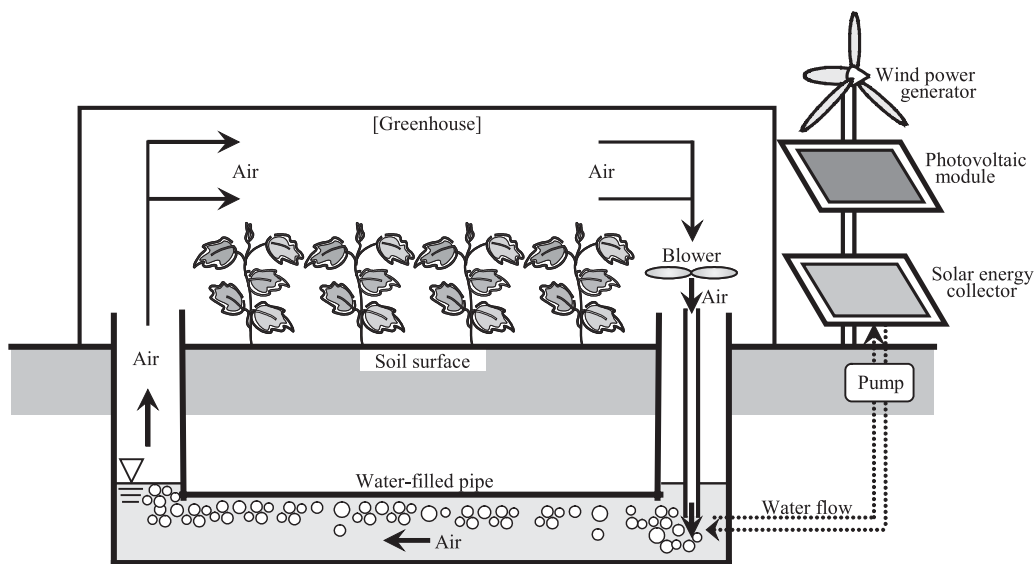


Fig.1 Schematic diagram of the newly developed hybrid solar/wind system for energy-saving management in a greenhouse. This system is composed of two parts: an underground water pipe system and a solar/wind generation system. The pipe system is used for controlling greenhouse air temperature through the exchange of sensible and latent heats between the water-filled pipe and the greenhouse. The solar/wind generation system is used for supplying electrical energy to the pipe system.

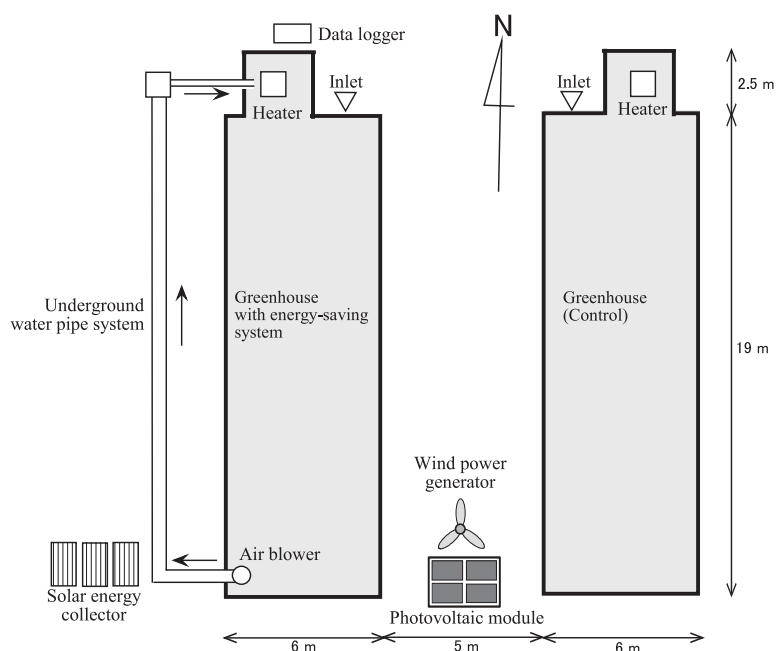


Fig.2 Plane figure of the hybrid solar/wind energy-saving system (underground water pipe system, solar energy collector, photovoltaic module, and wind power generator) installed in the greenhouse.

発電ユニット

太陽光・風力発電システムにおいては、太陽光発電機（型式：G128-01，パネル面積：4.35m²，定格出力：512W，(株)京セラ）と風力発電機（型式：Z-500XP，定格出力：450W，(株)ゼファール）を組み合わせ、自然エネルギー（太陽光および風力）によって、温室と地中貯水パイプとの間で空気を循環させるための送風機、および地中貯水パイプと太陽熱温水器との間で水を循環させるためのポンプの稼動電力源を得ることを主目的としている。太陽光発電用パネルは南向き30°の傾斜をつけて設置し、また風力発電用プロペラ（直径1.17m）は高さ6.5mのポールの上に設置した。本発電システムの写真および電力系統図をそれぞれ Fig.3-(a)および(b)に示す。太陽光および風力によって発電した電力は、充放電コントローラとインバータを介してAC100Vに変換された後、バッテリーに蓄電されて利用される。また電圧低下時には、電力源を自動的に切り替えることによって商用電力の使用も可能としている。

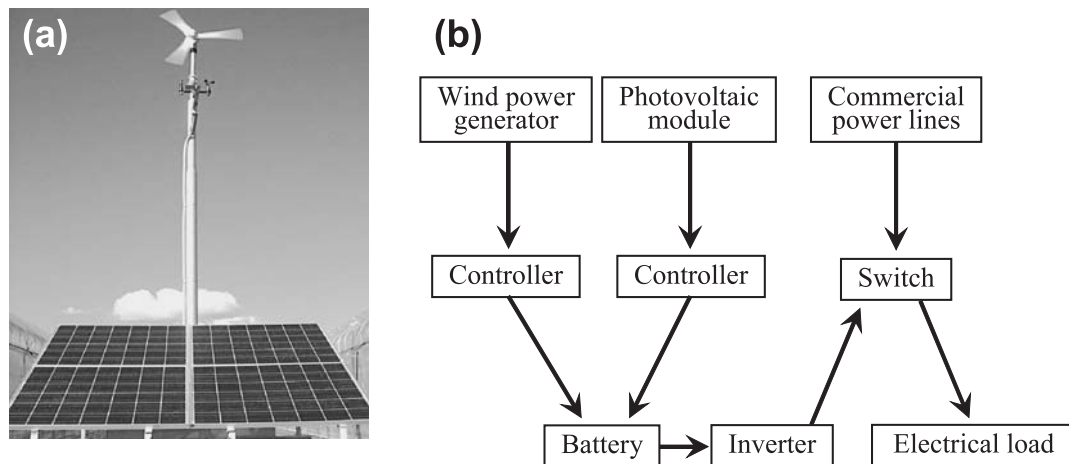


Fig.3 Photograph of the solar/wind generator (a) and block diagram of the electric flow (b).

計測項目

新規に構築・導入した省エネルギーシステムの効果を定量的に明らかにし、さらにシステムの稼動方法を最適化するためには、ハウス周辺の環境および各機器の電力特性の計測に基づいて、省エネルギーシステム導入温室のエネルギー収支を定量的に解析する必要がある。本研究における計測項目および使用した各種計測センサを以下の Table 1 に示す。地中貯水パイプ蓄放熱システムの入口出口の気温と湿度、および送風機と水循環ポンプの電力消費量に関するデータは、それぞれ10分間隔で記録した。それら以外の全てのデータは、2秒毎に計測した後、目的に応じて10分、30分、あるいは1時間平均値としてデータロガー（型式：NR-600，(株)キーエンス）に記録した。なお、このデータロガーは、温室北側に位置するプレハブ小屋内に設置されている（Fig.2）。

システム特性試験

本システムの蓄放熱特性および発電特性を、2007年3月11日6時～13日6時までの48時間のデータを解析して調べた。地中貯水パイプ蓄放熱システムを空気循環流量 Q 50 m³ h⁻¹で稼動させ、パイプ入口と出口の気温 ($T_{A\text{ in}}$, $T_{A\text{ out}}$; °C, あるいはK) および水蒸気密度 (W_{in} , W_{out} ; g m⁻³) の計測に基づいて、温室と地中貯水パイプ蓄放熱システムとの間における顕熱および潜熱の交換速度をそれぞれ以下の式で評価した。

Table 1 Instruments used for evaluating the energy balance of the greenhouse after the installation of the energy-saving system.

	Variable	Instrument
Outside the greenhouse	Solar radiation	CPR-PCM-01, Climatec
	Air temperature & humidity	CVS-HMP45A, VAISALA
	Wind speed & direction	CYG-3002, Climatec
	Soil temperature	Type T thermocouple
Inside the greenhouse	Net radiation	CPR-NR-LITE, Climatec
	Solar radiation	CPR-PCM-01, Climatec
	Air temperature & humidity	CVS-HMP45A, VAISALA
	Soil heat flux	CPR-PHF-01, Climatec
Underground water pipe system	Air temperature & humidity at the inlet and outlet of the water-filled pipe	RS-12, ESPEC MIC
	Water temperature	Type T thermocouple
	Electric energy consumption of the air blower	NR-1000, KEYENCE
Solar/wind generator	Electric current	NR-TH08, KEYENCE
	Electric pressure	NR-TH08, KEYENCE
Heater	Oil consumption	RN-LSN39, OVAL

$$H = C_p \rho Q (T_{A \text{ out}} - T_{A \text{ in}}) \quad (1)$$

$$\lambda E = \lambda Q (W_{\text{out}} - W_{\text{in}}) \quad (2)$$

ここで、 $H(\text{J s}^{-1})$ は顕熱交換速度、 $C_p \rho(\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1})$ は体積熱容量、 $\lambda E(\text{J s}^{-1})$ は潜熱交換速度、 $\lambda(\text{J g}^{-1})$ は水の気化潜熱である。

また、太陽光・風力発電システムによる発電特性を、日射量および風速の変動と関連付けて解析した。さらに、地中貯水パイプ蓄放熱システムの送風機および太陽熱温水器の水循環ポンプによる消費電力量をモニタリングし、発電量との関係を検討した。

結果および考察

特性試験時における気象要素

システム特性試験時の気象要素（ハウス外部の日射量 R_S 、気温 T_{A0} 、湿度 RH 、風速 u ）の日変化を Fig.4 に示す。 R_S は、6 時頃の日出とともに急激に上昇して正午にピークの約 900Wm^{-2} を迎えた後、18 時の日入にかけて減少した。これより、3 月 11、12 日の天候は快晴であったことが分かる。 T_{A0} は、日中は $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 、夜間は $2 \sim 5^\circ\text{C}$ 程度で推移した。 RH は、日中は乾燥して 20%、夜間は 50～80% 程度であった。 u （風向風速計は、温室棟高より 0.8m 上回る高さ 5 m の位置に設置）は変動が大きいものの、日中に大となる傾向を示し、3 月 11 日の日中は $4 \sim 6 \text{ m s}^{-1}$ であり、3 月 12 日の日中は前日より小さく、 $1 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ 程度であった。

蓄放熱特性

地中貯水パイプの入口出口の気温 $T_{A \text{ in}}$ 、 $T_{A \text{ out}}$ 、水蒸気密度 W_{in} 、 W_{out} 、およびパイプ内の水温 T_W の日変化を Fig.5 に示す。 $T_{A \text{ in}}$ は R_S に追従して $3 \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲で大きく変動したのに対して、 $T_{A \text{ out}}$ は T_W と同程度であり、 20°C 前後で比較的安定した値を示した。水蒸気密度に関しても気温と同様の傾向を示し、 W_{in} は $5 \sim 25 \text{ g m}^{-3}$ の範囲で日中に増加・夜間に低下したのに対して、

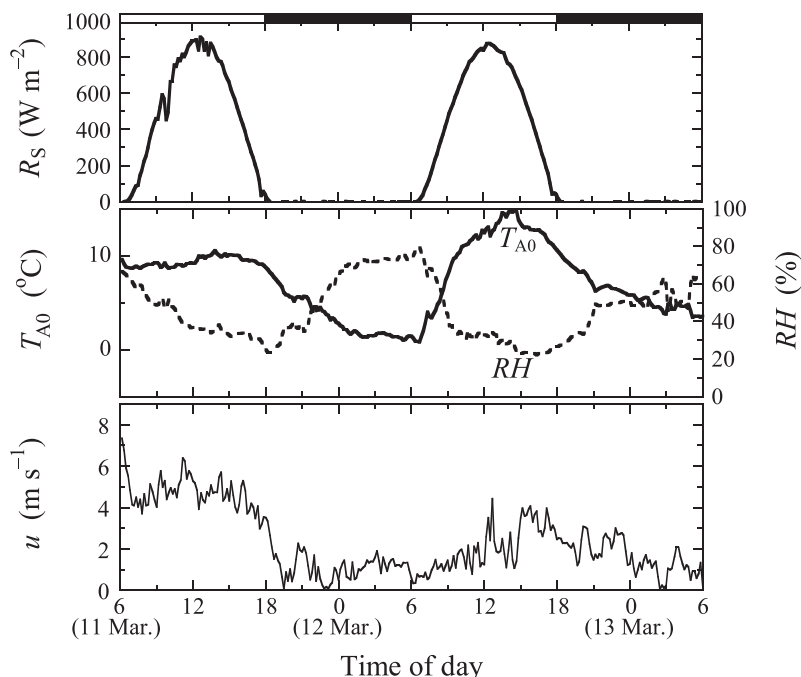


Fig.4 Diurnal changes in solar radiation (R_S), air temperature (T_A), air relative humidity (RH), and wind speed (u) outside the greenhouse during the experimental period (from 0600 on March 11 to 0600 on March 13, 2007). Open and closed bars in the upper part of the R_S graph indicate the daytime and nighttime periods, respectively.

W_{out} は $13 \sim 15 \text{ g m}^{-3}$ で 1 日を通してほぼ一定であった．これらのデータを基にして(1)および(2)式で計算した，温室と地中貯水パイプ蓄放熱システムとの間における顕熱 H および潜熱 λE の交換速度を Fig.6 に示す． H と λE は， $-300 \sim 300 \text{ J s}^{-1}$ の範囲で日中は負の値，逆に夜間は正の値を示した．これは，従来の地中熱交換システムと同様に^{6,7)}，日中においては，日射に由来する温室内余剰熱が地中貯水パイプへ蓄熱されたこと，および夜間においては，その熱が地中貯水パイプから温室内へ放熱されたことを意味している．顕熱と潜熱を合わせた 1 日当りの日中の総蓄熱量は 22.5 MJ であり，夜間の総放熱量は 34.6 MJ であった．また， H と λE の値が同程度であったことから，蓄放熱効果には，顕熱だけではなく潜熱の交換による効果も十分に寄与することが示唆された．

しかしながら，上記の蓄熱量（あるいは放熱量）の値は，日中温室内に入射する太陽エネルギー（温室内の日射量）のわずか 2 % 程度であり，システムの熱交換能力は高いとは言い難い．また，この温室に導入されている暖房機が，夜間に 10 時間稼動する場合の総熱量の試算は 1277 MJ ($12.77 \text{ MJ h}^{-1} \times 10 \text{ h}$) である．観測された夜間の放熱量 (34.6 MJ) がその 2.7% であることから，本蓄放熱システムによる蓄熱と放熱の能力が不足していることは明らかである．この原因として，1) 空気の水中曝気には大きな抵抗がかかるために循環している空気流量 ($50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) が小さい，および 2) 本蓄放熱システムと温室の規模のバランスが悪い（導入温室に対して本蓄放熱システムが小さすぎる），ことなどが考えられる．今後はこれらの点を踏まえた改善処置について十分に検討する必要がある．

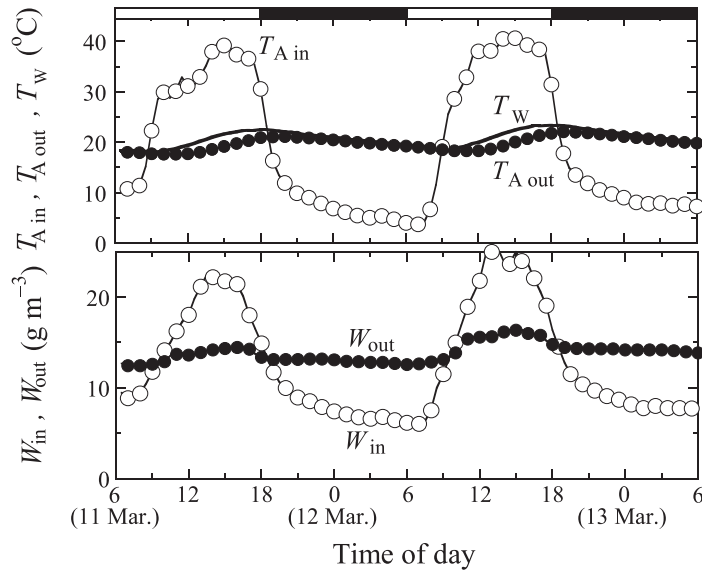


Fig.5 Diurnal changes in air temperatures ($T_{A \text{ in}}$ and $T_{A \text{ out}}$) and water vapor densities (W_{in} and W_{out}) at the inlet and outlet of the water-filled pipe during the experimental period (from 0600 on March 11 to 0600 on March 13, 2007). Water temperature (T_W) in the pipe is also shown. Open and closed bars in the upper part of the temperature graph indicate the daytime and nighttime periods, respectively.

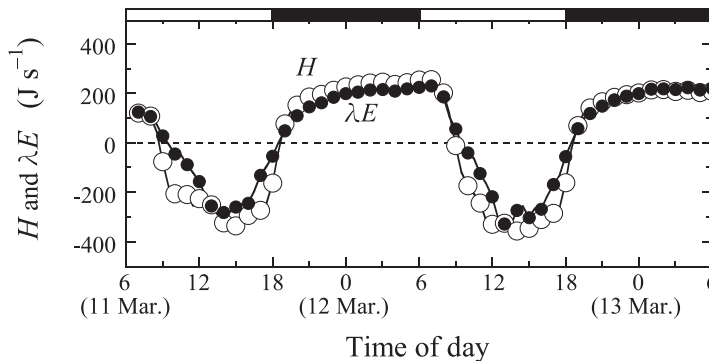


Fig.6 Diurnal changes in rates of exchange of sensible (H) and latent (λE) heats between the underground water pipe system and the greenhouse during the experimental period (from 0600 on March 11 to 0600 on March 13, 2007). Open and closed bars in the upper part of the graph indicate the daytime and nighttime periods, respectively.

発電特性

太陽光・風力発電システムによる発電量の日変化を Fig.7 に示す。太陽光発電機による発電量は、 R_S の変化に従って変動し、正午ごろにピークの 310 W m^{-2} となった。一方、風力発電機による発電量も風速の変化とともに変動する傾向を示したが、その値は太陽光発電量に比べて著しく小であった。本研究で導入した風力発電機 Z-500XP は、風速 11 m s^{-1} をこえたあたりから発電量が急激に増加する特性を持つ¹²⁾。したがって、特性試験時に温室周辺で観測された風速（日中は約 $1 \sim 6 \text{ m s}^{-1}$ ）では十分な発電量を見込むことは難しく、太陽光発電機に比べて発電効率が極めて小であった。

Fig.8 に、太陽光・風力発電システムによる発電量の合計と、送風機および水循環ポンプによる消費電力量の日変化を示す。1 日当りの発電量の合計は概ね 1500 Wh 程度であった。一方、送風機

および水循環ポンプによる消費電力はそれぞれ約900W および200W であることから両者稼働時の総消費電力は1100W となり、発電量の約10倍にも達している．本発電システムでこれを稼働させるとなると、インバータ効率を加味して、1時間程度しかその電力をまかなうことが出来ない．したがって、1) 消費電力の低い機器を使用する、および2) 電力を消費する機器の稼働方法を工夫する、などして総消費電力を減少させることが必要となる．例えば、水循環ポンプを日中6時間のみ稼働させるとすれば、その消費電力量は1650Wh であるため、バッテリーを利用して電力供給が可能であると考えられる．

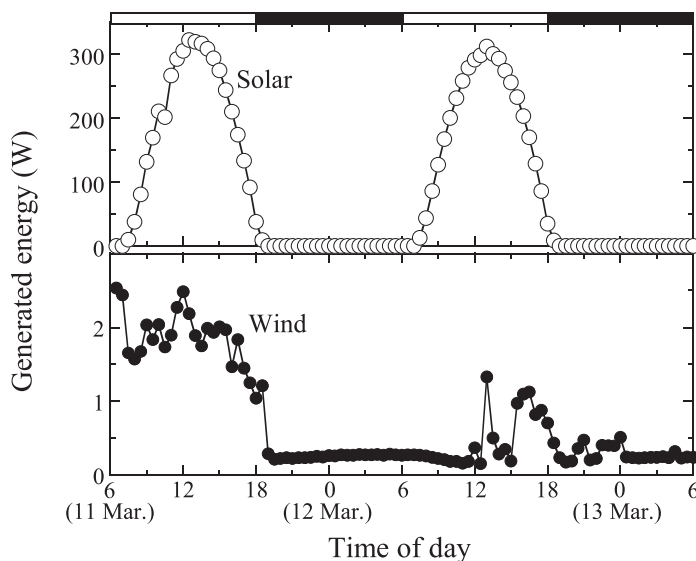


Fig.7 Diurnal changes in electrical energy produced by the solar and wind generator during the experimental period (from 0600 on March 11 to 0600 on March 13, 2007). Open and closed bars in the upper part of the graph indicate the daytime and nighttime periods, respectively.

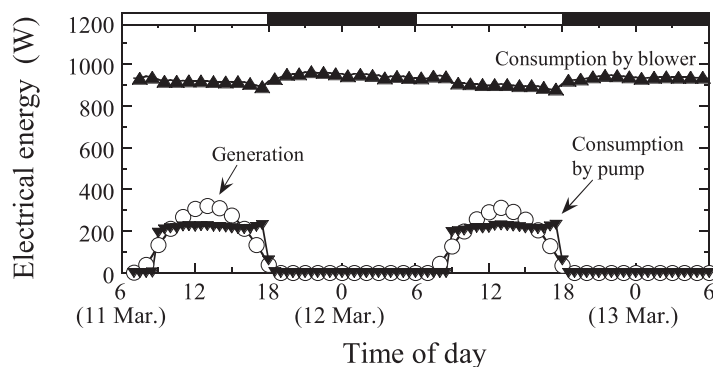


Fig.8 Diurnal changes in electrical generation and electrical consumption by blower and pump during the experimental period (from 0600 on March 11 to 0600 on March 13, 2007). Open and closed bars in the upper part of the graph indicate the daytime and nighttime periods, respectively.

結 論

園芸施設における自然エネルギー（太陽光，風力）を利用した省エネルギー技術を構築することを目的として，地中貯水パイプ蓄放熱システムおよび太陽光・風力発電システムで構成されるハイブリッド型システムを，高知大学農学部附属暖地フィールドサイエンス教育研究センター内の温室に試験的に導入し，その特性試験を行った．

地中貯水パイプ蓄放熱システムにおいては，日中の蓄熱と夜間の放熱が認められ，またその蓄放熱効果には，顕熱だけでなく潜熱の交換も十分に寄与することが示唆された．しかしながら，交換される熱量は，日中温室に入射する太陽エネルギーあるいは夜間暖房熱量のわずか数％程度であった．これは，温室－地中貯水パイプ間の空気循環流量が極めて少ないことに起因すると考えられる．したがって，本システムの蓄放熱能力を実用レベルにまで向上させるためには，空気循環流量を飛躍的に増加させる送風方法について検討することが必要である．

太陽光・風力発電システムにおいては，園芸施設周辺の自然エネルギーを利用した発電特性を定量的に明らかにした．1日当りの総発電量は約1500Whであり，その大部分が太陽光発電機に由来し，風力による発電量はほんの僅かであった．今回使用した風力発電機は，風速 10 m s^{-1} 以下では発電量が少なく，風速 11 m s^{-1} 以上になって高い発電能力を発揮する特性を持つ．そのような大きい風速は通常の温室周辺では望めないことから，現時点では，園芸施設における風力発電の実質的な利用は難しいと考える．一方，地中貯水パイプ蓄放熱システムの稼動（送風機とポンプの稼動）によって消費される電力は，発電されるそれよりも遥かに上回っていた．これは，主に送風機による消費電力量の多さに起因した．

したがって今後は，可能な限り少ない消費電力量で空気循環流量を飛躍的に増加させる送風方法を考案することが必須の課題である．また，経済性に基づく効率的なシステムの規模と運用法についても検討し，低コスト型省エネルギーシステムの実用化に向けて研究を進めたいと考える．

謝 辞

本研究は，日本施設園芸協会による施設園芸等新省エネルギー技術緊急導入支援事業，および日本学術振興会の科学研究費補助金（研究課題番号20380141，20880020）によって行われた．ここに謝意を表する．

引用文献

- 1) 安武大輔：施設園芸，気象利用研究の20年，p.65-70，SPA & Water 出版．(2008)
- 2) 日本施設園芸協会：5訂 施設園芸ハンドブック，562pp，園芸情報センター．(2003)
- 3) 木船一晶：太陽光・風力エネルギー，気象利用研究の20年，p.47-52，SPA & Water 出版．(2008)
- 4) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギー利用技術，198pp，オーム社．(2006)
- 5) 太陽・風編編集委員：施設農業への新エネルギー利用 太陽・風編，705pp，フジ・テクノシステム．(1980)
- 6) 山本雄二郎：地中熱交換ハウスの温度環境および熱特性，農業気象，29，11-15．(1973)
- 7) Mavroyanopoulos, G. N. and Krytsis, S. : The performance of a greenhouse heated by an earth air heat exchanger, Agricultural and Forrester Meteorology, 36, 263-268. (1986)

- 8) 高倉 直・山川健一：地中熱交換ハウスの設計 1 .定常一次元モデルによる解析 ,農業気象 , 37 , 187-196 .(1981)
- 9) Hanks, R. J. : Applied Soil Physics -Soil Water and Temperature Applications-, 176pp, Springer-Verlag. (1992)
- 10) Hillel, D. : Introduction to Environmental Soil Physics, 494pp, Academic Press, San Diego. (2003)
- 11) 谷野 章・土屋 和・西 和夫・森山友幸・井手 治・石坂 晃・外谷 優：太陽光発電エネルギーで作動する省電力型ハウス側窓開閉制御装置の開発 , 農業機械学会誌 , 67 , 100-110 . (2005)
- 12) ゼファー株式会社：Z-500XP パワー・アシスト・ウインド・タービン取扱説明書 , 15pp , ゼファー .(2003)